

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 622 + 004.942

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-139-147

ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ИЗЛИШНЕ ВЫПУЩЕННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ В ТЕХНОЛОГИИ ВЫПУСКА УГЛЯ ПОДКРОВЕЛЬНОЙ ТОЛЩИ

Черкасов Павел Вадимович^{1, 2 *},
Стародубов Алексей Николаевич^{1, 2}

¹ Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН² Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

* для корреспонденции: cherkasov.pavel.v@gmail.com



Информация о статье

Поступила:

12 февраля 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

10 июня 2025 г.

Принята к публикации:

20 июня 2025 г.

Опубликована:

26 июня 2025 г.

Ключевые слова:

имитационное моделирование,
горная масса, управляемый
выпуск, выпуск угля
подкровельной толщи, метод
дискретных элементов,
пользовательский процесс,
излишне выпущенная масса,
угол естественного откоса

Аннотация.

В связи с исчерпанием легкодоступных пластовых месторождений угля возрастает актуальность разработки трудноизвлекаемых запасов из мощных пластов. Для повышения эффективности подземной добычи полезных ископаемых используются перспективные технологии с выпуском угля подкровельной толщи на забойный конвейер при площадном либо волновом режимах. Работа посвящена исследованию процесса выпуска горной массы и обоснованию параметров элементов секций крепей механизированного комплекса на разработанной имитационной модели. Объектом исследования являлся процесс погрузки горной массы питателем на забойный конвейер. Необходимостью обеспечения выемки пласта на всю мощность при соблюдении полного заполнения конвейера без перегрузов при отсутствии возможности проведения натурных экспериментов обуславливается применение компьютерного моделирования для определения параметров процесса выпуска. В работе представлены основные параметры элементов имитационной модели. Кроме того, адекватность подобранных параметров подтверждена серией натурных экспериментов, направленных на определение угла естественного откоса угля. В результате проведенного сбора статистических данных массы частиц на участке конвейера, а также излишне выпущенной массы получены зависимости для различных конструктивных параметров элементов секций. Также предложены подходы к оценке излишне выпущенной горной массы на конвейер для предотвращения его переполнения и возникновения повышенных динамических нагрузок. Таким образом, формализована задача определения рационального варианта согласования режимов работы секций. Рациональные параметры режима выпуска на полученной модели в результате исследований и виртуальное отображение процесса добычи могут являться элементами программной реализации цифрового двойника роботизированного очистного комплекса с управляемым выпуском.

Для цитирования: Черкасов П.В., Стародубов А.Н. Подходы к оценке излишне выпущенной горной массы в технологии выпуска угля подкровельной толщи // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 3 (169). С. 139-147. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-139-147, EDN: BRZYDZ

Введение

Несмотря на то, что доля подземной добычи угля в Кузбассе составляет 34,2% от общего объема угледобычи [1], этот метод остается

востребованным. В условиях ограниченности легкодоступных промышленных запасов угля разработка трудноизвлекаемых запасов подкровельной толщи мощных пластов

становится особенно актуальной [2]. Для повышения эффективности подземной добычи полезных ископаемых используется перспективная технология с выпуском угля подкровельной толщи на забойный конвейер [3]. Кроме того, предложена конструкция секции крепи с управляемым выпуском (КУВ) [4]. Эта технология и конструкция крепи предполагают высокую степень автоматизации, что минимизирует присутствие человека в забое. Основная цель внедрения таких решений – снижение потерь при выпуске угля и обеспечение его максимальной полноты [5, 6].

Ранее авторами была показана

перспективность имитационного подхода для анализа процесса движения неоднородной сыпучей горной массы (ГМ), а также применения разработанной численной модели [7] (Рис. 1) в среде имитационного моделирования Rocky DEM [8]. Данные, получаемые с модели, и виртуальное отображение процесса добычи могут стать основой для создания программной реализации цифрового двойника роботизированного очистного комплекса с управляемым выпуском.

Лотковый (качающийся) питатель и шибберная заслонка представляют собой технические устройства, предназначенные для обеспечения

Таблица. Параметры имитационной модели механизированного комплекса

Table. Mathematic model of controlled release support complex parameters

Параметр	Значение		
Физика модели			
Нормальная сила	Hertzian Spring Dashpot		
Тангенциальная сила	Mindlin-Deresiewicz		
Модель сопротивления качению	Type C: Linear Spring Rolling Limit		
Конвейер			
Производительность, т/ч	1000		
Скоростью движения тягового органа, м/с	1		
Питатель секции крепи			
Частота, Гц	0,5		
Амплитуда, м	0,153		
Угол наклона относительно горизонтали, град	12		
Заслон секции крепи			
Угол наклона относительно вертикали, град	22		
Физические параметры частиц и материалов			
	Уголь	Горный массив	Сталь
Плотность, кг/м ³	1380	2300	7820
Модуль Юнга (упругости), ГПа	13	2,75	200
Коэффициент Пуассона	0,3	0,24	0,3
Параметры взаимодействия частиц и материалов			
	Уголь-Уголь	Уголь-Горный массив	Уголь-Сталь
Коэффициент восстановления	0,3	0,3	0,3
Геометрические параметры частиц			
	Уголь	Горный массив	
Геометрическая фигура	Сфера	Сфера	
Диаметр частиц, м	Соотношение, %		
0 – 0,09	13,83		-
0,09 – 0,18	46,31		-
0,18 – 0,27	20,34		-
0,27 – 0,36	19,52		13,83
0,36 – 0,45	-		46,31
0,45 – 0,54	-		20,34
0,54 – 0,63	-		19,52
	Слой угля	Слой горного массива	
Высота слоя над секцией крепи, м	3		6
Количественные параметры частиц			
	Уголь	Горный массив	
Количество сгенерированных частиц, шт	236 721		12 343
Параметры контактов между частицами			
	Уголь	Горный массив	
Коэффициент сопротивления качению	0.2		0.2

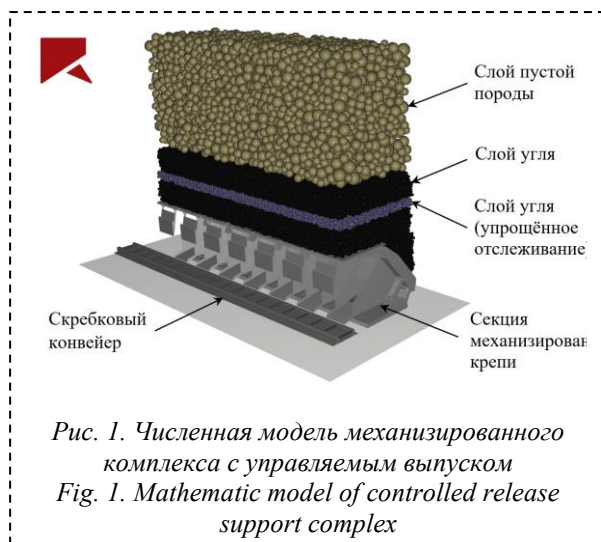


Рис. 1. Численная модель механизированного комплекса с управляемым выпуском
Fig. 1. Mathematic model of controlled release support complex

управляемого выпуска горной массы (ГМ). Управляемый выпуск возможен только при условии полного заполнения конвейера и исключения его перегрузки [9-11]. Оценить количество излишне выпущенной горной массы при одновременном дозированном выпуске из нескольких секций крепи возможно средствами компьютерного моделирования. Кроме этого, имитационными экспериментами возможно установить параметры согласованной работы секций механизированной крепи. Это позволит обеспечить выемку пласта на полную мощность

плоскостью, при котором масса еще сохраняет предельное равновесие. Величина УЕО зависит от сил трения, возникающих при перемещении частиц относительно друг друга, а также от сил сцепления между ними.

Таким образом, поведение шарообразных частиц в модели является подобным поведению реальной ГМ, подаваемой питателем секции крепи на забойный конвейер при управляемом выпуске. Подход к исследованию сыпучей дезинтегрированной среды в виде шарообразных частиц широко известен [5, 12, 13] и применяется для моделирования их поведения. Это обусловлено относительной простотой реализации алгоритмов и низкими вычислительными затратами. Появляется возможность исследовать параметры элементов секций крепи с управляемым выпуском угля подкровельной толщи и их взаимодействие с ГМ с достаточной степенью достоверности, чего гораздо сложнее добиться аналитическими методами.

В среде имитационного моделирования Rocky DEM имеются встроенные пакеты статистического анализа полученных данных. Так, пользовательские процессы в виде параллелепипедов определенной размерности позволяют получать различную статистику частиц в интересующей области. Например, можно узнать зависимость количества или массы

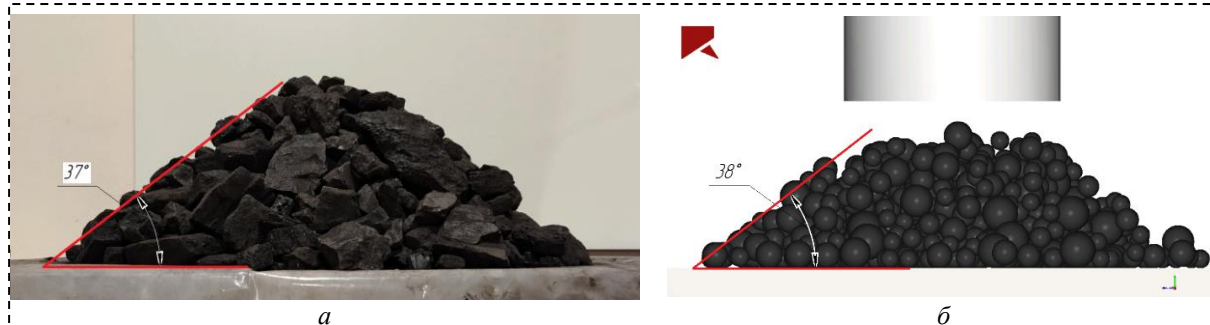


Рис. 2. Пример экспериментального определения угла естественного откоса, где: а – порция угля в лабораторных условиях; б – порция частиц в имитационной модели

Fig. 2. An example of experimental natural slope determination, where: a – coal portion in laboratory conditions, b – particle portion in model

при условии полного заполнения конвейера и исключения его перегрузок.

Параметры разработанной имитационной модели представлены в таблице

В имитационной модели частицы представляют собой предварительно разрушенную горную массу. Адекватность выбранных параметров частиц подтверждается серией натурных экспериментов, направленных на определение угла естественного откоса (УЕО) для угля (Рис. 2) в соответствии с методикой. Угол естественного откоса – это максимальный угол, который образует свободная поверхность рыхлой горной массы с горизонтальной

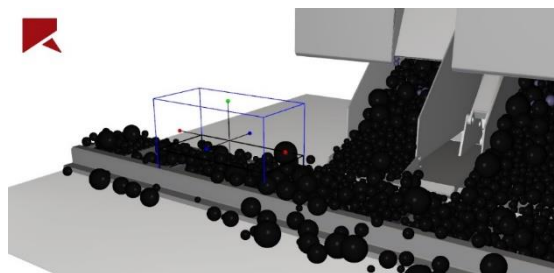


Рис. 3. Сбор статистических данных о горной массе на участке конвейера

Fig. 3. Rock mass on the conveyor data collecting

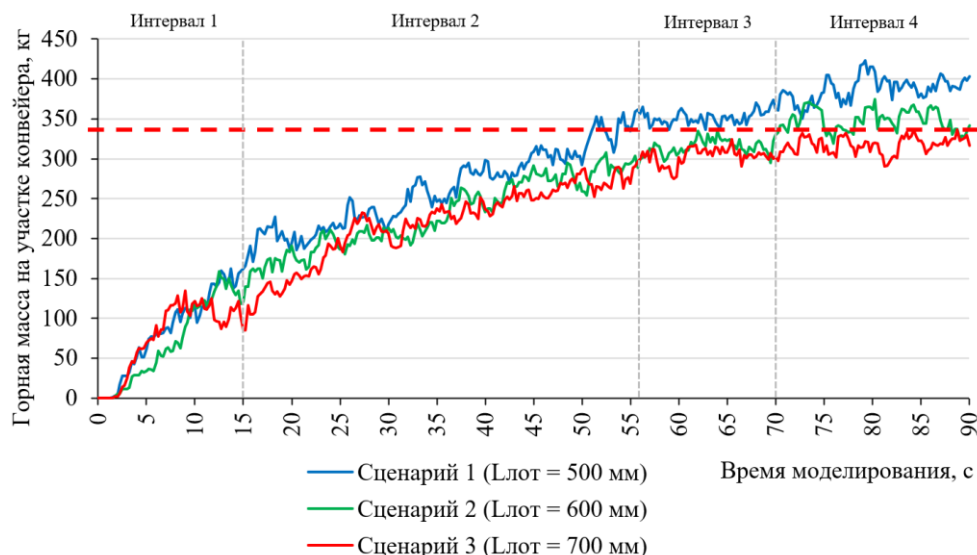


Рис. 4. Зависимость количественных параметров горной массы на участке конвейера от времени
Fig. 4. Dependence of conveyor rock mass quantitative parameters on time

частиц от времени, время пребывания частиц в заданной области и т. д. Также можно анализировать скорости, векторы ориентации частиц относительно выбранной оси, количественные и качественные параметры, а также пространственные координаты частиц. Размерность параллелепипеда определяется значениями его ширины, высоты и глубины, которые зависят от геометрических параметров исследуемой области и ограничений 3D-модели.

Статистический анализ количественных параметров частиц проводился на участке конвейера за седьмой секцией (Рис. 3). Участок имеет ширину, равную ширине решетки по боковинам, и длину, соответствующую проектному значению ширины секции крепи. 3D-модель скребкового конвейера соответствует модели «Анжера-30» производства ОАО «Анжеромаш» [14].

Моделирование процесса выпуска горной массы (ГМ) проводилось для трех сценариев, отличающихся длиной лотка питателя: 0,5 м, 0,6 м и 0,7 м. Ширина лотка соответствовала ширине

питателя, осуществляющего дискретную подачу ГМ, а также ширине выпускного окна секции крепи и составляла 1 м. Одним из подходов к оценке излишне выпущенной горной массы в технологии выпуска угля подкровельной толщи является расчет текущей массы частиц на участке конвейера. Полученное значение сравнивается с условным ограничением грузоподъемности конвейера, при котором он сохраняет свою эффективность.

На Рис. 4 представлены графики, отражающие количество горной массы (ГМ) на участке конвейера за седьмой секцией крепи в зависимости от времени. Часовая производительность конвейера составляет 1000 тонн. Расчетное ограничение его грузоподъемности — 280 кг/с. Это значение отмечено на графике красной пунктирной линией.

На Рис. 6 представлена зависимость излишне выпущенной горной массы (ГМ) на конвейер от времени. В реальных условиях конвейер ограничен забоем, и вся излишне выпущенная ГМ остается на нем, что приводит к переполнению участков конвейера и возникновению динамических нагрузок на его элементы. Это снижает эффективность работы конвейера и сокращает срок его службы из-за ускоренного износа конструктивных элементов [15].

В ходе исследования был проведен анализ для определения сценария, при котором излишне выпущенная масса ГМ будет минимальной. Рассмотрены три варианта длины лотка питателя: 0,5 м, 0,6 м и 0,7 м. Результаты анализа позволили установить, при какой длине лотка

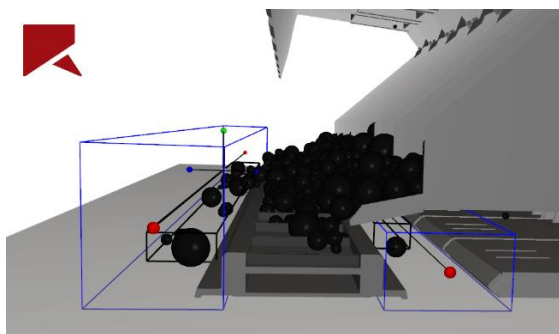


Рис. 5. Сбор статистических данных об излишне выпущенной горной массе на конвейер
Fig. 5. Excessively released rock mass on the conveyor data collecting

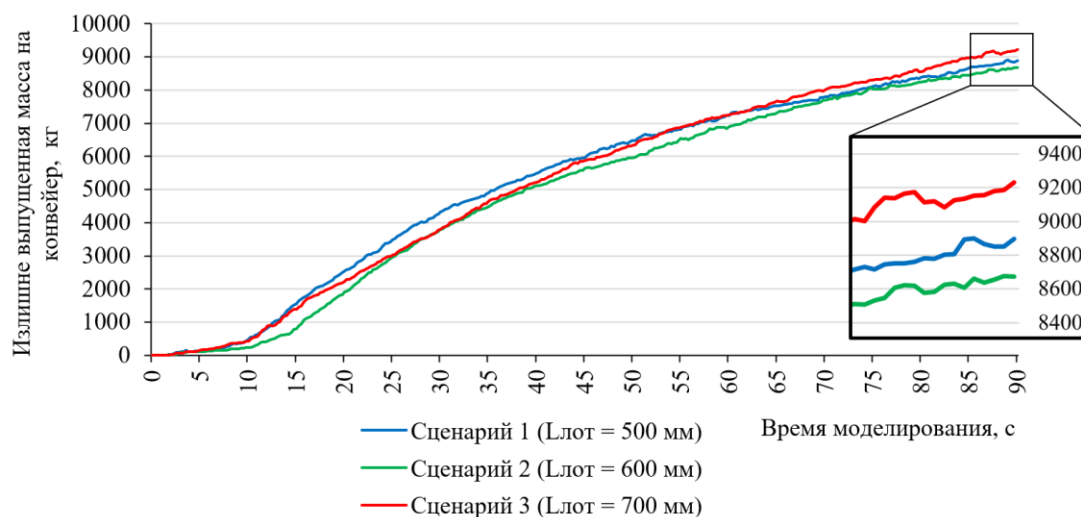


Рис. 6. Зависимость количественных параметров измине выпущенной горной массы на конвейер от времени

Fig. 6. Dependence of conveyor excessively released rock mass quantitative parameters on time

достигается наименьшее значение измине выпущенной массы, что является важным критерием для оптимизации работы конвейера.

После 15-й секунды моделирования наблюдается плавное возрастание кривых для всех сценариев с незначительными расхождениями, которые все же фиксируются. При длине лотка 0,6 м масса измине выпущенной массы минимальна и составляет 8672 кг. Это подтверждает наибольшую эффективность моделируемого процесса выпуска при сценарии 2.

Однако подходом к оценке измине выпущенной горной массы, который возможно применить и в качестве критерия эффективности наполнения конвейера, может являться попадание площади сечения наблюдаемого контура порции ГМ в площадь сечения ожидаемого контура. Пример поперечного сечения ожидаемого контура горной массы на конвейере представлен на Рис. 7.

Условный ожидаемый контур порции горной



Рис. 7. Пример поперечного сечения ожидаемого контура горной массы на конвейере

Fig. 7. Example of expected contour of the rock mass on the conveyor in the cross-section

массы (ГМ) на конвейере может быть представлен в виде равнобедренной трапеции со скругленными углами верхнего основания. Такая форма ожидаемого контура обусловлена свойствами дезинтегрированной ГМ: мелкие частицы стремятся заполнить пустоты между крупными фрагментами под действием силы тяжести [16]. Кроме того, масса ГМ ограничена горизонтальной плоскостью конвейера с учетом УЕО, который в работе принят 40°.

Суть предложенного подхода заключается в следующем. Для определения участков конвейера с измине выпущенной массой предлагается провести несколько поперечных сечений через транспортируемую ГМ. Сравнивая полученные контуры с ожидаемым, можно выявить зоны, где выпущенная масса превышает расчетную. Такой подход позволяет локализовать проблемные участки и оптимизировать процесс транспортировки ГМ к месту разгрузки.

На основе вышеизложенного установлено, что работа всех секций механизированного комплекса в едином режиме является неэффективной. Для повышения эффективности предлагается автоматизированная корректировка режимов работы элементов секций крепей в реальном времени. В связи с этим возникает задача определения рационального варианта согласования режимов работы секций, обеспечивающего полноту наполнения конвейера и исключающего его перегруз.

В качестве одного из возможных решений рассматривается площадной режим выпуска, например, «шахматный» выпуск с шагом через одну секцию. В этом случае горная масса (ГМ) над неработающими секциями поступает в выпускные окна соседних секций, что позволяет

минимизировать участки невыпущенного угля [16].

Другой вариант – волновой режим выпуска, при котором реализуется нисходящее понижение массового расхода угля на секциях с последующим смещением и перераспределением массового расхода питателями [5]. Такой подход позволяет более равномерно распределять нагрузку на конвейер и снижать риск его перегруза.

Оба варианта направлены на оптимизацию процесса выпуска ГМ и повышение эффективности работы механизированного комплекса.

Заключение

Таким образом, предложены подходы к оценке излишне выпущенной горной массы на конвейер. Применение предложенных подходов позволит принимать обоснованные решения при автоматизации части технологического процесса добычи горной массы, а также наиболее эффективно наполнять конвейер и оценивать производительность питателей. Вместе с тем экспериментально установлена эффективность наполнения конвейера при различных сценариях конструкции направляющего лотка на примере секции крепи с управляемым выпуском. Эта секция в настоящее время разрабатывается в Институте угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук (ФИЦ УУХ СО РАН). Результаты исследования могут быть применены и для других технологий добычи, а также для иных конструктивных исполнений секций.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2024-0024 «Разработка эффективных технологий добычи угля роботизированными горнодобывающими комплексами без постоянного присутствия людей в зонах ведения горных работ, систем управления и методов оценки технического состояния и диагностики их ресурса и обоснование обеспечения воспроизводства минерально-сырьевой базы. 2024-2025 гг.» (рег. № 124041100072-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Министерство угольной промышленности Кузбасса. Показатели деятельности угольной отрасли. Режим доступа: <https://mupk42.ru/ru/industry/pokazateli/> (дата обращения: 15.01.2025).
2. Новоселов С. В. РГМЦК-технологии для трудноизвлекаемых запасов угля на мощных крутых пластах – стратегическая перспектива Кузбасса // Уголь. 2024. № 10. С. 100–104. DOI:

10.18796/0041-5790-2024-10-100-104.

3. Zhou W. [и др.] Gangue Source Reduction Technology and Process Optimization Based on Underground Coal Gangue Photoelectric Separation // Processes. 2023. Vol. 11. Issue 9. P. 2519. DOI: 10.3390/pr11092519.

4. Клишин В. И., Худынцев Е. А. Создание механизированных комплексов с выпуском для подземной разработки мощных угольных пластов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. № 6(154). С. 96–106. DOI: 10.26730/1999-4125-2022-6-96-106.

5. Стародубов А. Н. [и др.] Применение имитационного моделирования для исследования режимов выпуска угля подкровельной толщи // Девятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности : Труды конф. Екатеринбург : УрГПУ, 2019. С. 540–547. EDN: ZRAQJN.

6. Никитенко М. С., Кизилов С. А., Захаров Ю. Н. [и др.] Измерение производительности питателя при выпуске угля из подкровельной толщи на основе технологии машинного зрения // Горные науки и технологии. 2022. Т. 7. № 4. С. 264–273. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-09-22. EDN: MAWGYW.

7. Черкасов П. В., Стародубов А. Н., Майоров А. Е. Перспективы применения имитационного подхода в исследовании автоматизированной добычи угля механизированным комплексом с управляемым выпуском // Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) AS'2024 : Труды Всероссийской науч.-практ. конф. (с международным участием). Новокузнецк : СибГИУ, 2024. С. 204–209. EDN: GMHIEC.

8. ESSS Rocky. Release 4.5.2. User Manual. S.R.L., 2021.

9. Guo X., Liu X., Zhou H. [и др.] Belt Tear Detection for Coal Mining Conveyors // Micromachines. 2022. Vol. 13. Issue 3. P. 449. DOI: 10.3390/mi13030449.

10. Wang L., Li H., Huang J. [и др.] Research on and Design of an Electric Drive Automatic Control System for Mine Belt Conveyors // Processes. 2023. Vol. 11. Issue 6. P. 1762. DOI: 10.3390/pr11061762.

11. Koken E., Abiodun I. L., Moshood O. [и др.] Comparative study on power calculation methods for conveyor belts in mining industry // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2021. Vol. 36. Issue 1. Pp. 26–45. DOI: 10.1080/17480930.2021.1949859.

12. Лаптев В. В. Численное моделирование потока раздробленной горной массы в процессе выпуска руды с использованием программы ROCKY DEM // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета, 2019. Т. 22. № 1. С. 149–157. DOI:

10.21443/1560-9278-2019-22-1-149-157.

13. Афонченко Д. С., Блинов В. Р., Павлова Ю. И. Особенности моделирования вибрирующего слоя средствами Rocky DEM // Сборник тезисов докладов участников пула научно-практических конференций. Керчь : КГМТУ ; ДОННУЭТ имени Михаила Туган-Барановского; ЛГПУ, 2021. С. 54–56. EDN: UDGMMVO.

14. Конвейеры скребковые забойные. Режим доступа: http://www.angera.ru/prod_04.htm (дата обращения: 15.01.2025).

15. Шепелина П. В. Особенности снижения динамических нагрузок в скребковых конвейерах // Проблемы современной науки и образования. 2016. № 35(77). С. 16–20. EDN: XBSQXD

16. Стародубов А. Н. [и др.] Исследование технологии добычи угля в сложных горно-геологических условиях с использованием математического моделирования // Горная промышленность. 2023. № S5. С. 47–52. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-5S-47-52. EDN: UTDRGS.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Черкасов Павел Вадимович, инженер, ФИЦ УУХ СО РАН (650000, Россия, г. Кемерово, пр-т Ленинградский, 10), аспирант, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: cherkasov.pavel.v@gmail.com

Стародубов Алексей Николаевич, заведующий лабораторией, ФИЦ УУХ СО РАН (650000, Россия, г. Кемерово, пр-т Ленинградский, 10), кандидат технических наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7577-9210>, e-mail: a.n.starodubov@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Черкасов Павел Вадимович – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, анализ данных, подведение итогов, написание текста, обзор актуальной литературы.

Стародубов Алексей Николаевич – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, анализ данных, подведение итогов, написание текста, обзор актуальной литературы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

APPROACHES TO EXCESSIVELY RELEASED ROCK MASS DETERMINATION IN LONGWALL TOP COAL CAVING TECHNOLOGY

Pavel V. Cherkasov ^{1,2 *},
Aleksey N. Starodubov ^{1,2}

¹ Federal Research Centre of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of Russian Academy of Science

² T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: cherkasov.pavel.v@gmail.com



Article info

Received:

12 February 2025

Accepted for publication:

10 June 2025

Accepted:

20 June 2025

Abstract.

Due to the exhaustion of easily accessible coal seam deposits, the urgency of developing hard-to-recover reserves from thick seams is increasing. To increase the efficiency of underground mining, promising technologies are used with longwall top coal caving in areal or wave modes. The work is devoted to the study of the releasing rock mass process and substantiating the support sections elements parameters of the mechanized complex on the developed simulation model. The object of the study was the process of loading rock mass with a feeder onto a downhole conveyor. The need to ensure that the conveyor works at full capacity without overloading, in the absence of conducting field experiments possibility, determines the use of computer modeling to study the release process parameters. The paper

Published:
26 June 2025

Keywords: simulation modeling, rock mass, release operation, high coal releasing, discrete element method, user process, excessively released mass, angle of the natural slope.

presents the simulation model elements main parameters. In addition, the adequacy of the selected parameters was confirmed by a series of field experiments aimed at determining the angle of the natural slope of coal. As a result of the statistical data collection on the mass of particles on the conveyor, as well as the excessively released mass, dependences for various design parameters of the section elements were obtained. Approaches to the assessment of excessively released rock mass on the conveyor are also proposed to prevent its overflow and the occurrence of increased dynamic loads. Thus, the task of determining a rational option for coordinating the operating modes of sections has been formalized. The rational parameters of the release mode on the obtained model as a result of research and the virtual display of the extraction process can be elements of the software implementation of the digital twin of a robotic treatment complex with controlled release.

For citation: Cherkasov P.V., Starodubov A.N. Approaches to excessively released rock mass determination in longwall top coal caving technology. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 3(169):139-147. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-139-147, EDN: BRZYDZ

REFERENCES

1. Ministry of Coal Industry of Kuzbass. Performance indicators of the coal industry. Access mode: <https://mupk42.ru/ru/industry/pokazateli/> (date of access: 15.01.2025). (In Russ.)
2. Novoselov S.V. RGMSHK-technologies for hard-to-recover coal reserves in powerful steep formations – a strategic perspective of Kuzbass. *Coal*. 2024; 10:100–104. (In Russ.) DOI: 10.18796/0041-5790-2024-10-100-104.
3. Zhou W., Xia W., Liu L., Li L., Zeng Q., Wang S., Zhu J. Gangue Source Reduction Technology and Process Optimization Based on Underground Coal Gangue Photoelectric Separation. *Processes*. 2023; 11(9):2519. (In Eng.) DOI: 10.3390/pr11092519.
4. Klishin V.I., Khudyntsev E.A. Creation of mechanized complexes with release for underground mining of powerful coal seams. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2022; 6(154):96–106. (In Russ.) DOI: 10.26730/1999-4125-2022-6-96-106
5. Starodubov A.N., Zinoviev V.V., Klishin V.I., Kramarenko V.A. Application of simulation modeling to study the modes of coal production in the subsurface. *The Ninth All-Russian Scientific and Practical Conference on Simulation Modeling and its application in Science and Industry*: Proceedings of the conference. Yekaterinburg: USPU. 2019; 540–547. (In Russ.) EDN: ZRAQJN.
6. Nikitenko M.S., Kizilov S.A., Zakharov Yu.N., Khudonogov D.Yu., Ignatova A.Yu. Measurement of feeder performance during coal discharge from an underroof seam using machine vision. *Mining Science and Technology*. 2022; 7(4):264–273. (In Russ.) DOI: 10.17073/2500-0632-2022-09-22. EDN: MAWGYW.
7. Cherkasov P.V., Starodubov A.N., Mayorov A.E. Prospects of using a simulation approach in the study of automated coal mining by a mechanized complex with controlled release. *Automation systems (in education, science and production) AS'2024*: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference. (with international participation). Novokuznetsk: SibGIU; 2024; 204–209. (In Russ.) EDN: GMHIEC.
8. ESSS Rocky. Release 4.5.2. User Manual. S.R.L.; 2021. (In Eng.)
9. Guo X., Liu X., Zhou H., Stanislawski R., Krolczyk G., Li Z. Belt Tear Detection for Coal Mining Conveyors. *Micromachines*. 2022; 13(3):449. (In Eng.) DOI: 10.3390/mi13030449.
10. Wang L., Li H., Huang J., Zeng J., Tang L., Wu W., Luo Y. Research on and Design of an Electric Drive Automatic Control System for Mine Belt Conveyors. *Processes*. 2023; 11(6):1762. (In Eng.) DOI: 10.3390/pr11061762.
11. Koken E., Abiodun I. L., Moshood O., Ahmet O. A comparative study on power calculation methods for conveyor belts in mining industry. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2021; 36(1):26–45. (In Eng.) DOI: 10.1080/17480930.2021.1949859.
12. Laptev V.V. Numerical simulation of the flow of crushed rock mass in the process of ore release using the ROCKY DEM program. *Bulletin of the Moscow State Technical University*. Proceedings of the Murmansk State Technical University. 2019; 22(1):149–157. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-1-149-157
13. Afenchenko D.S., Blinov V.R., Pavlova Yu.I. Features of modeling the vibrating boiling layer by means of Rocky DEM. *Collection of abstracts of reports of participants in the pool of scientific and practical conferences*. Kerch: KGMTU; Mikhail Tugan-Baranovsky DONNUET; LGPU. 2021; 54–56. (In Russ.) EDN: UDGMVO.
14. Downhole scraper conveyors. Access mode: http://www.angera.ru/prod_04.htm (date of access: 15.01.2025). (In Russ.)
15. Shepelina P.V. Features of reducing dynamic loads in scraper conveyors. *Problems of modern science*

and education. 2016; 35(77):16–20. (In Russ.) EDN: XBSQXD

16. Starodubov A.N., Klishin V.I., Kadochigova A.N., Kaplun A.V. Research of coal

mining technology in difficult mining and geological conditions using mathematical modeling. *Mining industry*. 2023; S5:47–52. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2023-5S-47-52. EDN: UTDRGS

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Pavel V. Cherkasov, Engineer, FRC CCC SB RAS (650000, Russia, Kemerovo, Leningradsky av., 10), postgraduate, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya str., 28), e-mail: cherkasov.pavel.v@gmail.com

Aleksey N. Starodubov, Head of Laboratory of the Institute of Coal, FRC CCC SB RAS (650000, Russia, Kemerovo, Leningradsky av., 10), Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya str., 28), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7577-9210>, e-mail: a.n.starodubov@gmail.com

Contribution of the authors:

Pavel V. Cherkasov – setting the research problem, conceptualisation of the study, data analysis, summarising, writing, review of current literature.

Aleksey N. Starodubov – setting the research problem, conceptualisation of the study, data analysis, summarising, writing, review of current literature.

All authors have read and approved the final manuscript.

